JB. nass. Ver. Naturk.	107	S. 53—72	1 Tab.	Wiesbaden 1984

Die Erforschungsgeschichte des Eiszeitalters*

Von HELMUT REICHMANN, Wiesbaden**

Mit 1 Tabelle

Die unterschiedlichen Namen des Vierten Weltalters, des Quartärs, spiegeln den Meinungswandel der Naturforscher und Erdwissenschaftler in den letzten 200 Jahren wider. Sie weisen auf die unvermeidlichen Holzwege der Forschung hin, die irgendwo enden, ohne zu einem Ziel zu führen. Ihre Kenntnisnahme gibt einen nützlichen Einblick in die immer kostspieliger werdenden Unternehmungen der Wissenschaft, sie trägt zugleich zu einem tieferen Verständnis der erdgeschichtlichen Zeitspanne bei.

Sintflut

Viele Naturforscher des 18. und des beginnenden 19. Jahrhunderts konnten sich nicht vorstellen, daß die an vielen Orten im „aufgeschwemmten Gebirge" befindlichen großen Klötze aus ortsfremdem Gestein, seit 1827 als Findlinge bekannt, anders als durch gewaltige Fluten transportiert worden seien. Sie wurden als Zeugen der biblischen Sintflut angesehen. Ein anderer Name dieser Findlinge ist Irrblöcke oder erratische Blöcke.

In ähnlicher Weise wurden Fossilien für Relikte vorsintflutlicher oder – wie es damals hieß – antediluvianischer Lebewesen gehalten. Im Jahre 1726 entdeckte der Zürcher Stadtarzt und Professor der Mathematik JOHANN JAKOB SCHEUCHZER (1672–1733) einen vermeintlichen fossilen Menschen in Schichten, denen wir heute ein jungtertiäres Alter zuerkennen, und beschrieb das Fossil in einer 1731 erschienenen bebilderten Bibel als Homo diluvii tristis testis. Er kommentierte dazu: „Betrübtes Beingerüst von einem armen Sünder – Erweiche Sinn und Herz der neuen Bosheitskinder!" Der große Zoologe GEORGES CUVIER erkannte im Jahre 1811 darin das Relikt eines über 1 m langen Riesensalamanders, der später den Namen *Andrias scheuchzeri* erhielt. Trotz dieses Irrtums ist SCHEUCHZER ein großer Naturforscher gewesen, unter

* Dieser Beitrag stellt die ein wenig veränderte Fassung eines Vortrages dar, den der Verfasser am 9. Oktober 1984 im Museum Wiesbaden gehalten hat.

** Dr. HELMUT REICHMANN, Sandhasenweg 7, 6200 Wiesbaden-Heßloch

anderem brachte er im Jahre 1709 ein Werk über fossile Pflanzen mit dem Titel „Herbarium diluvianum" heraus, das ihn als Begründer der Paläobotanik ausweist.

In den ersten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts wurde das Denken von der Kataklysmen- oder Katastrophentheorie CUVIERS stark beeinflußt. Kataklysmós ist der griechische Ausdruck für große Überflutung oder Sintflut. GEORGES CUVIER (1769–1832) hatte wenige Jahre nach SCHILLER die Karlsschule in Stuttgart besucht und war später als Zoologe am Naturhistorischen Museum in Paris tätig. Sein dortiges Wirken brachte ihm den Ruhm ein, der Begründer der vergleichenden Anatomie und der Paläozoologie als Wissenschaften zu sein. Er nahm die Konstanz der Arten an, d. h. daß sich nach seiner Meinung die Tierarten seit der Schöpfung nicht verändert hätten, da sie in ihrem so überaus komplizierten Bau jeweils so zweckmäßig geschaffen worden seien, daß sie bedeutende Veränderungen nicht hätten überleben können. Aus den paläontologischen Befunden schloß er deshalb auf wiederholte Naturkatastrophen, welche die jeweilige Lebewelt vernichteten. Im Gegensatz zu dem Pariser Professor ALCIDE D'ORBIGNY (1802–1857), dem ersten Paläontologen Frankreichs für die wirbellosen Tiere, ging CUVIER jedoch nicht von weltweiten Katastrophen aus, denen Neuschöpfungen folgten, er glaubte an die Einwanderung der neuen Lebewelt aus verschont gebliebenen Gebieten. Mit seinem Werk aus dem Jahre 1826 „Discours sur les révolutions de la surface du Globe" verschaffte CUVIER jedoch der alten Vorstellung über die Sintflut neuen Auftrieb. Ihre Bestätigung in der Geologie suchte der englische Geistliche, Professor der Mineralogie und Geologie in Oxford, Dekan von Westminster und Präsident der bis heute angesehenen Geological Society WILLIAM BUCKLAND (1784–1856). Das Ergebnis seiner Bemühungen ist ein im Jahre 1824 in London erschienenes Buch mit dem Titel „Reliquiae Diluvianae". Kurz zuvor im Jahre 1823 hatte er vorgeschlagen, die vermeintlich sintflutlichen Ablagerungen als Diluvium zu bezeichnen. Dieser Name hielt sich insbesondere in Deutschland bis in die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg.

Drifttheorie

Mit der besseren Kenntnis der Polarregionen gewann die Vorstellung an Überzeugungskraft, daß die großen Findlinge wie auch die kleineren Geschiebe, die nach unserem heutigen Wissen von Gletschern mitgeschleppt wurden, von im Meer driftenden Eisbergen mitgenommen und während des Schmelzens auf dem Meeresboden verstreut worden seien. Spätere Hebung machte diesen Meeresboden dann zum Festland. In Großbritannien hat sich der Name „Drift" für die dem norddeutschen Geschiebemergel vergleichbare

Ablagerung bis heute erhalten. Verfechter dieser Lehre war der Schotte CHARLES LYELL (1797–1875). Er war zunächst Advokat, verschrieb sich dann aber ganz der Geologie. Er löste im Jahre 1835 mit seiner aktualistischen Drifttheorie die Katastrophentheorie ab. „Aktualistisch" meint, daß in den zurückliegenden Zeiten der Erdgeschichte alle Vorgänge in derselben Art und Weise und in derselben Größenordnung wie heute abgelaufen seien. Dieser Idee liegt die Auffassung von schrittweiser Veränderung an Stelle von umwälzenden Katastrophen zugrunde.

LYELL zog aus seiner Erkenntnis noch eine weitere Konsequenz. Im Jahre 1839 prägte er den Begriff „Pleistozän" an Stelle des Diluviums. Bereits vorher hatte er die Tertiärzeit in die Epochen Eozän, Miozän und Pliozän aufgegliedert, und nun fügte er das Pleistozän hinzu. Diese Bezeichnungen leiten sich aus dem Griechischen ab, wobei die einzelnen Silben bedeuten: kainos – neu, eos – Dämmerung, meion – weniger, pleion – mehr und pleistos – am meisten. Das Pleistozän LYELLS enthielt damals noch die 10 000 Jahre der Nacheiszeit bis zur Gegenwart, die erst später als Holozän, das Allerneueste, bezeichnet wurden. Die Abtrennung des Pleistozäns vom Pliozän geschah auf paläontologischer Grundlage. LYELL definierte, daß diejenigen Meeresablagerungen zum Pleistozän gehören sollten, deren fossile Molluskenfauna zu mehr als 70% heute noch lebende Arten enthält.

Glazialtheorie

Die heute allgemein anerkannte Glazialtheorie hat eine lange Geschichte. Von mehreren Naturforschern war bereits im 18. Jahrhundert das zeitweilige Vorrücken von Gletschern erkannt worden. Die Auffassung, daß die ortsfremden Findlingsblöcke allein durch Gletscher fortbewegt worden seien, wurde erstmals in dem im Jahre 1802 in Edinburgh erschienen Werk von JOHN PLAYFAIR „Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth" vertreten. PLAYFAIR (1748–1819), ein Pfarrerssohn aus der schottischen Grafschaft Angus, war zunächst ebenfalls Pfarrer geworden, erlangte dann jedoch in Edinburgh eine Professur für Mathematik, die er später mit dem Lehramt für Philosophie vertauschte. In die Geologie wurde er durch JAMES HUTTON (1726–1797) eingeführt, den Urheber der plutonischen Theorie über die Entstehung der Gesteine und Gebirge, die mit dem Neptunismus der Freiberger Schule GOTTLOB ABRAHAM WERNERS im Widerstreit lag. In den Jahren 1815 und 1816 unternahm er eine größere Reise, die ihn unter anderem auch in die Schweiz führte. Hier schloß er, wie der Salinendirektor in Bex (Kanton Waadt) JOHANN VON CHARPENTIER später berichtete, aus den Findlingen des Jura auf ehemals gewaltige Gletscher in der Schweiz. Etwa um

dieselbe Zeit erklärte der Gemsjäger JEAN-PIERRE PERRAUDIN dem einer Hugenottenfamilie in Freiberg (Sachsen) entstammenden JOHANN von CHARPENTIER in einem Gespräch über die ortsfremden Felsblöcke, daß sie in den Tälern der Walliser Alpen durch Gletscher verfrachtet worden seien, die früher viel tiefer herabgereicht hätten. Von CHARPENTIER, später Honorarprofessor der Geologie an der Akademie in Lausanne und ein bedeutender Glazialforscher, war damals von dieser Auffassung nicht überzeugt. Seine Bemühungen, den Irrtum aufzuklären, machten ihm im Gegenteil zu einem entschiedenen Verfechter der Glaziallehre. Es ist sein Verdienst, als erster die Spuren der Gletscher richtig gedeutet und von anderen Bildungen unterschieden zu haben. Schließlich sprach im Jahre 1829 bei der Zusammenkunft der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft auf dem Großen Sankt Bernhard der Ingenieur IGNAZ VENETZ (1788–1859) den Gedanken einer Vergletscherung der gesamten Schweiz öffentlich aus. Kurz darauf vertrat im Jahre 1832 der Professor an einer Forstakademie bei Meiningen, REINHARD BERNHARDI (in der Fachliteratur als A. BERNHARDI bekannt) in Leonhards & Bronns Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie und Petrefaktenkunde als erster die Meinung, daß die skandinavischen Eismassen einst bis nach Norddeutschland vorgedrungen seien. Bereits 1824 hatte der Professor der Bergbauwissenschaft in Oslo, B. J. ESMARK, ein Schüler der Bergakademie Freiberg, die Vergletscherung Norwegens bis zur Küste postuliert und behauptet, daß auch das Meer gefroren gewesen sei.

Geistiges Allgemeingut, jedoch nicht allgemein anerkannt, wurde die Gletschertheorie erst durch den schweizerischen Naturforscher LOUIS AGASSIZ (1807–1873). Er hatte in Zürich, Heidelberg und München Zoologie und Medizin studiert und anschließend eine Arbeit über fossile Fische begonnen, bei der CUVIER ihn mit Sammlungsstücken aus Paris unterstützte. Sein Förderer ALEXANDER von HUMBOLDT verhalf ihm im Jahre 1832 zu einer Professur für Naturgeschichte an der Akademie in Neuchâtel, das damals zwar schon der Eidgenossenschaft angehörte, jedoch zugleich ein Fürstentum mit dem König von Preußen als Landesherrn darstellte. Mitte der 40er Jahre des vorigen Jahrhunderts gab Agassiz diese Stelle auf, ging nach Amerika und wirkte von 1848 bis zu seinem Tode als Professor der Zoologie und Geologie an der Harvard Universität in Cambridge bei Boston. Berühmt wurde er durch das im Jahre 1840 erschiene Werk „Etudes sur les Glaciers“, das er VENETZ und VON CHARPENTIER widmete. Letzerer hatte ihn zusammen mit seinem Studienfreund KARL SCHIMPER im Jahre 1834 nach Bex eingeladen und ihn für die Glaziallehre gewonnen.

KARL SCHIMPER (1803–1867), Privatgelehrter in München, Mannheim und Schwetzingen, hatte bei Vorträgen in München auf Findlinge hingewiesen, die durch Eistransport aus den Alpen bis zum Starnberger See gelangt waren. Bei

einer Galilei-Feier im Jahre 1837 sprach er zum ersten Mal von einer Eiszeit mit langandauernder kalter Temperatur und Eisbildung. Eine Veröffentlichung aus demselben Jahr trägt den Titel „Über die Eiszeit“. Er wurde damit zum Begründer der Paläoklimatologie. Es wird berichtet, daß es deswegen zu einem Prioritätenstreit zwischen SCHIMPER und AGASSIZ gekommen sei, der zum Bruch der langjährigen Freundschaft führte.

Trotz dieser Erkenntnisse dauerte es noch eine Weile, bis sich die Glazialtheorie durchsetzen konnte. Das lag teilweise an dem Irrtum von LOUIS AGASSIZ, daß sich in Europa eine riesige Eisdecke vom Nordpol bis zum Südrand der Alpen ausgebreitet habe. Zwar ließen viele Geologen gelten, daß die Hochgebirge stärker vergletschert gewesen seien, zweifelten jedoch an der Eisbedeckung auch des flachen Landes, z. B. Norddeutschlands. Die von den bedeutendsten Gelehrten der damaligen Zeit geteilte Überzeugung von der Gültigkeit der Drifttheorie konnte nicht erschüttert werden. Nicht zuletzt wurde argumentiert, daß die These einer so weit reichenden Eisbedeckung an die Katastrophentheorie anknüpfe und mit dem Aktualismus unvereinbar sei. Ferner stand die der Glazialtheorie implizite Wiedererwärmung der Erde im Widerspruch zur damals aufgekommenen Gebirgsbildungstheorie, wonach die Erde immer mehr erkaltet und schrumpft.

Der Vortrag OTTO TORELLS (1828–1900) auf der Berliner Versammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft im Jahre 1875, dem Todesjahr LYELLS, leitete schließlich den Meinungsumschwung ein. TORELL war zunächst Professor in Lund und seit 1871 Chef der geologischen Landesuntersuchung in Stockholm. Den deutschen Geologen als brillanter Glazialforscher bekannt, verfocht er die Meinung, daß der nordische Eisschild sich einst so weit ausgebreitet habe, wie die Moränenkiese mit skandinavischen Leitblöcken reichten. Das bedeutete, daß sich das Eis bis zu den Nordhängen der deutschen Mittelgebirge ausgedehnt haben müßte. Unmittelbar vor seinem Vortrag hatten zwei Geologen der Preußischen Geologischen Landesanstalt ihn zu den Muschelkalksteinbrüchen in Rüdersdorf bei Berlin geführt, wo kurz zuvor besonders eindrucksvolle Gletscherschliffe und -schrammen freigelegt worden waren. Ihr dortiges Vorkommen war schon längere Zeit bekannt, und TORELL hatte Rüdersdorf bereits mehrmals besucht. Er nahm mehrere große Handstücke mit und erklärte in seinem Vortrag „Schliff-Flächen und Schrammen auf der Oberfläche des Muschelkalkes von Rüdersdorf“, daß diese Erscheinungen unzweifelhaft glaziärer Natur seien. Zwar wurden Gletscherschrammen vorher schon durch VON CHARPENTIER und AGASSIZ als Beweise einer Eisbedeckung neben polierten Felsoberflächen, sog. Rundhöckern, und Moränen angesehen, andererseits wurde es für möglich gehalten, daß in Schlammfluten mitgeführte Steine Schrammen verursacht hätten, oder daß in Übereinstimmung mit der Driftheorie solche Schrammen beim Stranden

driftender Eisberge entstanden sein könnten. Polierte Felsoberflächen wurden von einigen Autoren auch als Ergebnis von „Wasserglättung" angesehen, wie sie in Bachbetten beobachtet werden kann. TORELL erregte bei seinen Zuhörern großes Aufsehen, fand allerdings kaum Zustimmung. Dennoch bewirkte er in der darauffolgenden Zeit einen Paradigmenwechsel im Sinne des amerikanischen Wissenschaftshistorikers THOMAS S. KUHN (1962, deutsch 1967), der in seinem Buch „Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen" die Geschichte der Wissenschaft als eine Abfolge von Leitbildern darstellt, die für die Gemeinschaft der Forschenden für jeweils längere Zeit hinsichtlich der Auswahl ihrer Forschungsgegenstände richtungsweisend waren. Auch die Ablösung der Sintflutvorstellung in der Geologie durch den Aktualismus muß als ein Paradigmenwechsel aufgefaßt werden.

Gliederung des Eiszeitalters

Bereits im Jahre 1854 hatte erstmals der Lausanner Professor ADOLPH DE MORLOT (1820–1867), auch er hatte in Freiberg studiert, aus der Wechsellagerung von Moränen mit lignitführenden Schottern in der Nähe des Genfer Sees auf zwei Eiszeiten geschlossen, und etwa ein Jahr vor TORELLS Vortrag in Berlin hatte der schottische Geologe JAMES GEIKIE in seinem Werk „The Great Ice Age and its Relation to the Antiquity of Man" vom Eiszeitalter als einer Epoche mit wechselnden Glazial- und Interglazialen gesprochen. Im Jahre 1879 veröffentliche dann ALBRECHT PENCK in der Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft eine Gliederung des norddeutschen Pleistozäns in drei Glaziale und zwei Interglaziale. ALBRECHT PENCK (1858–1945) war damals erst 21 Jahre alt. Er hatte ein Jahr zuvor in Leipzig promoviert und wurde im Jahr 1906 Nachfolger FERDINAND VON RICHTHOFENS als Ordinarius für Geographie an der Berliner Universität. Zu Beginn dieses Jahrhunderts verfaßte ALBRECHT PENCK zusammen mit dem aus Jena stammenden Wiener Professor EDUARD BRÜCKNER das dreibändige Werk „Die Alpen im Eiszeitalter", in dessen erstem, JAMES GEIKIE und JOHN PLAYFAIR gewidmeten Band die klassisch gewordene Unterteilung in die vier Eiszeiten, benannt nach den Donauzuflüssen Günz, Mindel, Riß und Würm, vorgeschlagen wurde. Die Namen Elster-, Saale- und Weichsel-Eiszeit werden dem Berliner Geologen, Geh. Bergrat und Professor KONRAD KEILHACK (1852–1944) zugeschrieben (NILSSON 1983: 161). Das ist allerdings nur teilweise berechtigt, denn der Landesgeologe A. JENTZSCH bezeichnete bereits im Jahrbuch der Preußischen Geologischen Landesanstalt für das Jahr 1905, erschienen 1908, den „jüngsten baltischen Eisstrom" als Weichselgletscher.

Zur Vorgeschichte des Werkes von PENCK und BRÜCKNER sei angemerkt, daß die Sektion Breslau des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins im März 1887 die Erforschung der Vergletscherung der österreichischen Alpen als Preisaufgabe gestellt hatte. In Karten und Profilzeichnungen sollte die Ausdehnung der diluvialen Eisströme dargestellt und auf die Probleme der Glazialgeologie eingegangen werden. Die beiden Autoren erhielten den Preis von 3000 Mark zuerkannt. Für ALBRECHT PENCK war das zum zweiten Mal, daß er einen Preis erhielt, denn bereits im Jahre 1880 hatte die Ludwig-Maximilian-Universität in München eine ähnliche Preisaufgabe gestellt, die PENCK mit seinem Werk aus dem Jahre 1882 über die Vergletscherung der deutschen Alpen löste.

PENCK und BRÜCKNER entwickelten die Vorstellung, daß die mit Schutt beladenen Schmelzwässer im Vorfeld der alpinen Gletscher während der Eiszeiten sogenannte Decken- und Terrassenschotter abgelagert haben, und daß während der Interglazialzeiten bei geringerer Schuttzufuhr in den Schotterfluren durch Erosion Täler ausgeräumt worden seien. Durch Wiederholung dieser Vorgänge in den späteren Zyklen von Eis- und Zwischeneiszeit und gleichzeitiger Hebung des Alpenvorlandes bildete sich eine Folge von Terrassen, die älteren oben und die jüngeren unten. An einigen Orten gelang es, eine Verknüpfung der Schotter mit Moränen zu finden. Die vier klassischen Eiszeiten wurden bei späteren Untersuchungen weiter aufgegliedert, wobei Namen wie Günz I, II und III, Mindel I und II usw. eingeführt wurden. Ferner fand man noch höher liegende Schotter, die man als Hinweise auf zwei ältere Eiszeiten betrachtete, die nach Biber und Donau benannt wurden.

Meeresspiegelveränderungen

Schon im 18. Jahrhundert wurden in Skandinavien Überlegungen über die Ursachen von Höhenveränderungen des Meeresspiegels angestellt. Man stellte fest, daß ehemalige Hafenplätze inzwischen tief landeinwärts lagen, ferner fand man weit von der Küste entfernte Muschelbänke, welche die einstigen Strandlinien markierten. Die beiden berühmten Schweden CARL VON LINNÉ (1707–1778) und ANDERS CELSIUS (1701–1744) glaubten an ein Absinken des Ostseespiegels durch Verminderung der Wassermenge. CELSIUS versuchte sogar, diese Abnahme zu berechnen, mit der Folge, daß ein Historiker zu dem Ergebnis kam, Schweden müsse zur Zeit Christi von Wasser bedeckt gewesen sein. Das widersprach dem patriotischen Anspruch, daß Schweden das älteste Land nach der Sintflut sei. Die Theologen ließen als Grund für die Wasserabnahme allein den Rückgang der Sintflut gelten, weshalb der geistliche Stand beim Reichstag des Jahres 1747 gegen diese Art historischer Forschung

protestierte. Andere Naturforscher machten dagegen Landhebungen geltend. Allen voran gehörte zu den Verfechtern dieser Meinung der bedeutendste deutsche Geologe des vorigen Jahrhunderts, LEOPOLD VON BUCH (1774–1853), auch er kam aus der Freiberger Schule ABRAHAM GOTTLOB WERNERS.

Die sich allmählich durchsetzende Glazialtheorie ermöglichte indessen ein genaueres Bild von dem Phänomen der Strandverschiebung. Nun wurden Überlegungen über die während der Eiszeiten dem Meer entzogenen und in den Eismassen auf dem Festland gebundenen Wassermassen angestellt. ALBRECHT PENCK stellte Berechnungen für die letzte Eiszeit an und ermittelte eine Meeresspiegelabsenkung gegenüber der Gegenwart um ca. 70 m, ein Betrag, der heute mit 90 bis 100 m angenommen wird. Derartige weltweite Höhenänderungen der Meeresoberfläche nennt man glazial-eustatische Spiegelschwankungen. Ein völliges Schwinden der heutigen Gletscher würde dem Weltmeer eine Wassersäule von rd. 75 m zuführen, seinen Spiegel allerdings nur um etwa 50 m steigen lassen, da mit einem Nachgeben des Untergrundes unter der vergrößerten Last zu rechnen wäre. Diese zuletzt genannte Komponente der Meeresspiegelveränderung weist auf die Lehre vom hydrostatischen Gleichgewicht der Erdkrustenschollen mit dem darunterfolgenden Erdmantel hin. Man nennt sie Isostasie. Man stelle sich ein Schiff vor, das beim Beladen eintaucht und beim Entladen aus dem Wasser aufsteigt. Darauf beruhende lokale Meeresspiegelschwankungen an einer Küste bezeichnet man als isostatisch. Skandinavien hat demnach unter der Last der Eisschilde eine Senkung und mit einiger Verzögerung nach dem Abschmelzen des Eises eine Landhebung erfahren, die vom eustatischen Meeresspiegelanstieg teilweise wieder ausgeglichen wurde.

Auf Meeresspiegelschwankungen wird auch die an den Küsten rings um das Mittelmeer auftretende Treppe von Terrassen zurückgeführt. Die einzelnen Stufen werden der abhobelnden Wirkung der Brandungswellen während längerer Stillstandsphasen der Meeresspiegelveränderungen zugeschrieben. Die höchste Stufe liegt 200 m über, die tiefste mehr als 100 m unter dem heutigen Meeresspiegel. Der französische Geologe M. GIGNOUX gliederte erstmals im Jahre 1913 zwischen 15 und 35 m über dem Meer eine tyrrhenische und zwischen 40 und 60 m über dem Meer eine sizilianische Terrassenfläche aus. Der erste, welcher nun den Versuch unternahm, diese marinen Terrassen unter der Annahme glazial-eustatischer Meeresspiegelschwankungen mit der Gliederung des Eiszeitalters bzw. des Pleistozäns aufzustellen, war der in Lyon lehrende Geologieprofessor CHARLES DÉPÉRET (1854–1929). Im Jahre 1918 unterschied er von oben nach unten folgende Meeresspiegelhochstände: Siciliano, Milazziano, Tyrrheniano und Monastiriano (der letztgenannte Name wird von dem tunesischen Ort Monastir abgeleitet). Bis heute ist diese Korrelation ein kontroverses Thema nicht nur deswegen, weil tektonische

Einflüsse mit ihren Höhenveränderungen des Festlandes unberücksichtigt blieben, auch die Zuordnung hoher Meeresspiegel zu Interglazialzeiten ist nicht frei von Zweifeln. Beispielsweise enthalten die Ablagerungen des sizilianischen Meeresvorstoßes Schalen der Muschel *Artica islandica*, eines sog. nordischen Gastes im Mittelmeer, der kalte Verhältnisse anzeigt. Erst in neuester Zeit gelingt es, mit neuartigen physikalischen Methoden die Meeresablagerungen auf den Terrassen der Küsten Italiens genauer zu datieren und damit Licht in die Angelegenheit zu bringen.

Besser korrelierbar mit Interglazialzeiten sind zwei Meeresvorstöße an der Nordseeküste, deren Ablagerungen zunächst als präglazial angesehen wurden. Der ältere der beiden zeigt seinen warmzeitlichen Charakter an Austernfunden. Bereits im Jahre 1835 hatte der Kopenhagener Professor G. FORCHHAMMER über die Austernbänke von Tarbeck bei Bornhöved in Holstein berichtet. Diesem in späterer Zeit mit der Mindel/Riß-Zwischeneiszeit gleichgesetzten Meeresvorstoß gab ALBRECHT PENCK im Jahre 1922 den Namen Holsteinsee. Der jüngere der beiden Vorstöße erhielt den Namen Eem-Meer, benannt nach einem kleinen Flüßchen in den Niederlanden. Der Berliner Landesgeologe WILHELM WOLFF erkannte als erster, daß die durch südliche, wärmeliebende Mollusken, sog. Lusitanische Arten, gekennzeichnete Eem-Warmzeit der jüngsten Zwischeneiszeit entspricht (GRAHLE 1936).

Betrachtet man die Tabelle 1 mit der zeitlichen Gliederung des Pleistozäns, so sieht man, daß die Namen Holstein- und Eem-Warmzeit nicht die einzigen Bezeichnungen für Zwischeneiszeiten geblieben sind. An der englischen Ostküste befindet sich der Ort Cromer. Nach ihm wurden Schichten, die Süßwasser- und Brackwasserablagerungen darstellen und Baumstümpfe enthalten, als Cromer Forest Bed bezeichnet. Die ursprüngliche Vorstellung, es handele sich um Reste von Bäumen, die dort gewachsen sind, mußte korrigiert werden. Heute glaubt man aufgrund von Geröllen, daß es sich um Ablagerungen an einer alten Rheinmündung handelt. Damals war demnach Großbritannien mit dem europäischen Festland verbunden. JAMES GEIKIE deutet im Jahre 1894 das Forest Bed als interglaziale Ablagerung. In der neueren Fachliteratur findet man allerdings nicht die Bezeichnung Cromer-Warmzeit, sondern es ist in der Regel vom Cromer-Komplex die Rede. Damit hat es folgende Bewandtnis. Das Gebiet des Niederrheins und der Rheinmündung ist eine der Schlüsselregionen für die heutige Gliederung der europäischen Pleistozänablagerungen. Bis hierher reichten die größten Eisdecken Nordeuropas, hier treten aufgrund der seit der Tertiärzeit vorherrschenden Senkungstendenz erhebliche Sedimentmächtigkeiten auf, und hier vor allem bietet sich die Möglichkeit einer Korrelation von kontinentalen und marinen Ablagerungen. In den letzten 30 Jahren ist hauptsächlich WALDO ZAGWIJN vom niederländischen Geologischen Dienst in Haarlem mit Veröf-

Tab. 1 : Gliederung des Pleistozäns

	Alter in Mio. Jahren	Magnetfeld	Paläomagnetische Epochen	Episoden (Events)	Nordische Kalt- und Warmzeiten bzw. Komplexe	Alpine Eiszeiten
Pleistozän		normal	Brunhes		Weichsel	Würm
					Eem	
					Saale	Riß
					Holstein	
					Elster	Mindel
	0,5				Cromer	
	7,0					
		umgekehrt	Matuyama		Menap	Günz ?
	1,0			Jaramillo		
					Waal	
	1,5				Eburon	Donau ?
				Olduvai		
	2,0				Tegelen	
	2,48				Prätegelen	Biber ?
Pliozän	2,5		Gauss			

fentlichungen hervorgetreten. Er benannte eine Serie aus vier interglazialen Ablagerungen und Hinweisen auf drei dazwischenliegende Kaltzeiten Cromer-Komplex, obwohl die exakte Verknüpfung mit dem Cromer Ostenglands, dessen Mehrgliedrigkeit inzwischen ebenfalls erkannt worden ist, Schwierig-

keiten bereitet. Auf dem europäischen Kontinent wird heute unter „Cromer" immer der in den Niederlanden definierte Cromer-Komplex verstanden. Das gilt u. a. auch für die Datierung der Mosbacher Sande in Wiesbaden, welche die Überreste einer über die Landesgrenzen hinaus berühmten Großsäugerfauna enthalten. Sie wurden an der Mainmündung zusammengeschwemmt und vom Flußsand zugedeckt. Der Cromer-Komplex wird heute meist als Zeiteinheit vor der Elster- bzw. Mindeleiszeit angesehen. Es ist bei der Korrelation mit der alpinen Gliederung gegenwärtig jedoch so vieles im Fluß, daß es ratsam ist, sie überhaupt zu vermeiden.

Mit dem zeitlichen Abstand nehmen die Schwierigkeiten in der Pleistozängliederung erheblich zu. Hatte man zunächst in der niederländischen Gliederung jenseits des Cromer-Komplexes noch von der Menap-Kaltzeit, der Waal-Warmzeit, der Eburon-Kaltzeit, der Tegelen-Warmzeit und – als Beginn des Eiszeitalters – von der Prätegelen-Kaltzeit gesprochen, so ziehen es heute viele Autoren vor, auch in diesen Fällen von Komplexen zu reden, da bei näherem Hinsehen auch hier weitere Warm-/Kaltzeitzyklen festgestellt werden konnten. Am Rhein vermeidet man es dabei, von Eiszeit zu sprechen, da eindeutige Hinweise auf eine große Ausdehnung der Gletscher im ältesten Pleistozän fehlen. Erstmals gibt sich am Niederrhein im Menap-Komplex eine echte Eiszeit zu erkennen, der dann weitere sehr kalte Eiszeiten gefolgt sind.

Die Grenze zwischen Pliozän und Pleistozän

Am Niederrhein wird der Beginn des Pleistozäns durch eine markante Zunahme der Nichtbaumpollen in den Sedimenten des Prätegelen angezeigt. Der Wald der Pliozänzeit wich damals einer offenen subarktischen Landschaft. Es sieht so aus, als entspräche diesem durch einen sprunghaften Wandel in der Flora gekennzeichneten Klimawechsel annähernd die Einwanderung „nordischer Gäste" in der mediterranen Meeresfauna des Calabriano, wie es durch Gignoux in Kalabrien/Unteritalien definiert worden war. Auf dem Internationalen Geologenkongreß in London 1948 wurde die Übereinkunft getroffen, an der Basis der dem Calabriano zugeordneten Meeresablagerungen die Grenze zwischen dem Pliozän und dem Pleistozän zu ziehen. Darüber hinaus wurde in festländischen Ablagerungen Oberitaliens eine Grenzziehung zwischen Plio- und Pleistozän versucht. Leider sind jedoch die an Säugetierresten reichen Fundschichten im oberen Arnotal, dem Valdarno, nur unbefriedigend datierbar, da die gleichartigen Schichten bei Villafranca d'Asti in Piemont im unteren Abschnitt noch bis in das Pliozän hineinreichen. Dessen ungeachtet ist

jedoch von Interesse, daß sich die pleistozäne Säugerfauna des unteren und mittleren Villafranchiano durch die Einwanderung echter Elefanten, des einhufigen Pferdes und des echten Rindes auszeichnet. Vor allem die Elefanten, die sich im Verlauf des Pleistozäns den Lebensbedingungen in kalten Steppen angepaßt haben, wurden häufig zur Korrelation kontinentaler Schichten in voneinander entfernten Sedimentationsräumen herangezogen. Zunehmende Bedeutung erlangen hier allerdings Kleinsäuger, wie z. B. die Arvicoliden (Wühlmäuse), die sich durch eine kürzere Generationenfolge und raschere Evolution auszeichnen und in Festlandsablagerungen häufig zu finden sind.

Absolute Altersdatierung, Magnetostratigraphie, Paläotemperaturen

Die Eiszeitforschung wurde in den letzten Jahrzehnten durch radiometrische und andere physikalische Methoden der absoluten Altersdatierung außerordentlich begünstigt. Zu nennen ist hier zunächst die im Jahre 1946 von dem Amerikaner WILLARD FRANK LIBBY entwickelte Methode der Radiokarbondatierung, für die ihm im Jahre 1960 der Nobelpreis für Chemie verliehen wurde. Das instabile Isotop Kohlenstoff-14, kurz ^{14}C genannt, entsteht in der oberen Atmosphäre unter dem Einfluß kosmischer Neutronenstrahlung aus Stickstoff-14. Es verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft zu CO_2 und vermischt sich mit dem übrigen CO_2 der Atmosphäre. Von hier wird es von lebenden Pflanzen und Tieren aufgenommen. Da durch den Stoffwechsel beim lebenden Organismus ein ständiger Austausch von Kohlenstoffverbindungen stattfindet, bleibt der Prozentsatz an ^{14}C in den Pflanzen und Tieren konstant. In der toten Materie zerfällt es allmählich, ohne wieder ersetzt zu werden. Aus der Menge des noch vorhandenen ^{14}C und der Halbwertszeit kann so die Zahl der Jahre seit dem Absterben des Organismus bestimmt werden. Die Methode erlaubt Altersbestimmungen bis etwa 40 000, maximal 50 000 Jahre. Das reicht leider nicht aus, um den Beginn der letzten Eiszeit vor etwa 75 000 Jahren ermitteln zu können. Für das Messen längerer Zeiträume hat deshalb seit 1948 neben einigen anderen Verfahren die Kalium-Argon-Methode Bedeutung erlangt. Kalium enthält stets geringe Mengen des Isotops ^{40}K, das bei der Alterung durch Einbau eines Elektrons aus der Elektronenhülle in den Atomkern in ^{40}Ar übergeht. Da Argon in gesteinsbildenden Mineralen sonst nicht vorkommt, kann aus seiner Menge und der Halbwertszeit das Alter berechnet werden. Von den übrigen Verfahren seien hier nur erwähnt die Uran-Thorium-Methode, die auf dem Zerfall von Uran-234 in Thorium-230 beruht, und als neuestes das ESR-Verfahren, das auf die Elektronen-Spin-Re-

sonanz zurückgeht. Hier wird aus Strahlenschädigungen im Kristallbau beispielsweise des Calcits von Molluskenschalen auf das Alter geschlossen.

Die Kalium-Argon-Methode hat ein ganz besonderes Interesse im Zusammenhang mit der in den letzten Jahrzehnten aufgekommenen paläomagnetischen Korrelation erlangt, die darauf basiert, daß die Polarität des erdmagnetischen Feldes im Lauf der Zeit mehrfach gewechselt hat. Der remanente Magnetismus der Gesteine erlaubt in Verbindung mit der radiometrischen Altersbestimmung, die bisherigen Umpolungen zu datieren und in einer paläomagnetischen Zeitskala (Tab. 1) zu erfassen. Die Intervalle umfassen Tausende von Jahren. Man unterscheidet paläomagnetische Epochen von mehr als 100 000 Jahren und Episoden oder Events mit kürzerer Zeitspanne. Wir leben heute in der normal polarisierten BRUNHES-Epoche. Sie wurde nach B. BRUNHES benannt, der im Jahre 1906 nachwies, daß im französischen Zentralmassiv Lavaströme entgegengesetzt zur gegenwärtigen Magnetfeldrichtung magnetisiert sind. Die BRUNHES-Epoche löste vor rd. 700 000 Jahren die umgekehrt polarisierte MATUYAMA-Epoche ab, benannt nach M. MATUYAMA, der im Jahre 1929 erstmals entgegengesetzte Magnetfeldrichtungen in altpleistozänen und jüngeren Laven Japans und der Mandschurei feststellte. Die MATUYAMA-Epoche folgte vor beinahe 2,5 Mio. Jahren der normal polarisierten GAUSS-Epoche. Mit dieser Benennung wurde der Göttinger Mathematiker, Astronom und Physiker KARL FRIEDRICH GAUSS (1977–1855) geehrt, der wesentliches zur Theorie des Erdmagnetismus beigetragen hat. Eine noch ältere paläomagnetische Epoche erhielt ihren Namen nach WILLIAM GILBERT, dem Leibarzt der englischen Königin Elisabeth I. Er erkannte im Jahre 1600, daß die Erde selbst ein großer Magnet ist.

Glücklicherweise lassen sich die gleichsam „eingefrorenen" erdmagnetischen Feldrichtungen nicht nur in vulkanischen Gesteinen nachweisen, auch Sedimente können die während der Ablagerung erworbenen remanenten magnetischen Eigenschaften bewahren. In den Mosbacher Sanden in Wiesbaden konnte beispielsweise ermittelt werden, daß die Sedimente über der Hauptfundschicht der berühmten Mosbacher Säugerfauna normal magnetisiert ist, also der BRUNHES-Epoche angehört und somit jünger als 700 000 Jahre ist. Das sogenannte Graue oder Haupt-Mosbach soll dagegen jünger als die JARAMILLO-Episode und damit jünger als 900 000 Jahre sein. Hierdurch ist das Alter der Hauptfundschicht bis auf rd. 200 000 Jahre eingeengt.

Den Beginn des Pleistozäns vermutet man am Niederrhein in der Nähe des Übergangs von der GAUSS- zur MATUYAMA-Epoche vor nicht ganz 2,5 Mio. Jahren. Die absoluten Datierungen in den Meeresablagerungen an der Küste Kalabriens mit „nordischen Gästen" unter der Meeresfauna sind nicht ganz eindeutig, sie schwanken zwischen 2,1 und 2,5 Mio. Jahren, wobei dem letztgenannten Wert die größere Wahrscheinlichkeit eingeräumt wird. Dieses

Alter deckt sich ungefähr mit den Zeitvorstellungen über den Beginn der Vergletscherung Grönlands. Im Rahmen eines Tiefseebohrprogramms hat man in Ablagerungen des Labradorbeckens zwischen der Halbinsel Labrador und Grönland das älteste von Eisbergen verdriftete Gesteinsmaterial mit ungefähr 2,5 Mio. Jahren datiert. Es gibt jedoch Anzeichen dafür, daß in höheren Breiten der Erde noch während des Tertiärs eine Abkühlung eintrat, u. a. weist verdriftetes Material in Bohrkernen aus dem Nordpolarmeer darauf hin. In der Antarktis begann die Vergletscherung vor mindestens 5 Mio. Jahren, einige Autoren schätzen sogar vor mehr als 7 Mio. Jahren.

Im Jahre 1949 schlug der amerikanische Nobelpreisträger HAROLD CLAYTON UREY vor, carbonatische Schalen beispielsweise von Foraminiferen als „Carbonat-Thermometer“ zu benutzen. An fossilen Schalen in Meeresablagerungen sind damit Paläotemperaturbestimmungen des Meerwassers möglich. Die Methode beruht darauf, daß der Sauerstoff neben gewöhnlichem ^{16}O auch einen Anteil von etwa 0,2% ^{18}O enthält, der bei niedrigen Temperaturen stärker als bei höheren in das Carbonat eingebaut wird. Planktonische Foraminiferen liefern auf diese Weise Angaben über die Oberflächentemperaturen des Meeres und benthonische über die Temperaturen am Meeresboden. Der in Florida wirkende Meeresforscher CESARE EMILIANI testete die Methode als erster in den 50er und 60er Jahren und benutzte dabei Bohrkerne aus der Tiefsee, um mit Hilfe der Sauerstoffisotopenmethode Paläotemperaturkurven zu zeichnen. Die Temperaturdaten wurden dabei durch Altersbestimmungen ergänzt. Kritiker vertreten allerdings die Ansicht, daß diese Kurven weniger die Paläotemperatur des Ozeanwassers wiedergeben als vielmehr seine Isotopenzusammensetzung. Sie wiederum spiegelt nach deren Meinung die unterschiedlichen Eismassen auf der Erde wider. Da nämlich Wassermoleküle mit ^{16}O leichter verdunsten als solche mit dem schwereren ^{18}O, ist das Niederschlagswasser und damit das Gletschereis relativ arm an ^{18}O. Meerwasser, das viel Schmelzwasser enthält, und das durch geringe Verdunstung gekennzeichnet ist, enthält deshalb weniger ^{18}O als beispielsweise Oberflächenwasser in Äquatornähe, das hoher Verdunstung ausgesetzt ist. Der Meinungsstreit darüber, welcher der beiden Effekte vorherrscht, Temperaturwechsel des Ozeanwassers oder Eismassenveränderung, hat nicht an Versuchen gehindert, die Amplituden der ^{18}O-Kurve und die paläoklimatischen Zyklen auf den Kontinenten aufeinander abzustimmen. Wenn nicht alles täuscht, scheinen die neuesten Kurven aus dem Pazifik zu ergeben, daß innerhalb der BRUNHES-Epoche, also während der letzten 700 000 Jahre, acht vollständige Glazialzyklen stattgefunden haben. Aus Pazifik und Atlantik zeichnet sich ab, daß die ^{18}O-Kurve der letzten 400 000 Jahre fünf Temperaturminima aufweist. Der aus Prag nach Amerika ausgewanderte Quartärforscher GEORG KUKLA schrieb im Jahre 1977, daß die Sauerstoffisotopen-

kurven aus den Tiefseebohrkernen die bis jetzt besten Auskünfte über den pleistozänen Klimaverlauf geben. Jede andere paläoklimatische Pleistozängliederung muß nach seinen Worten dem Vergleich damit standhalten.

Ursachen der Eiszeiten

Im Gegensatz zu AGASSIZ vertrat VON CHARPENTIER nicht die Auffassung einer zusammenhängenden Eisbedeckung der nördlichen Halbkugel. Er hielt die Ausdehnung der Gletscher Skandinaviens und der Alpen eher für lokale Erscheinungen und sah ihren Grund in der Heraushebung der Gebirge. AGASSIZ schrieb dagegen die Eisbildung bzw. das Abschmelzen der Eismassen Richtungsänderungen des Golfstroms zu. Das Absinken der mittelamerikanischen Landenge soll dazu geführt haben, daß der Golfstrom in den Pazifik anstatt in den nördlichen Atlantik abfloß.

Der Gedanke, daß eine wechselnde Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere Schwankungen des CO_2-Gehaltes, als Ursache der Eiszeiten in Frage komme, wurde im Jahre 1896 von dem späteren schwedischen Nobelpreisträger SVANTE ARRHENIUS (1859–1927) in die Diskussion gebracht. Dabei spielt eine Art von Treibhauseffekt eine Rolle. Er beruht darauf, daß das kurzwellige Sonnenlicht bis zum Erdboden gelangt und ihn erwärmt, während die entgegengesetzte langwellige Wärmeausstrahlung vom CO_2 der Atmosphäre absorbiert wird. Die CO_2-haltige Atmosphäre wirkt demnach wärmespeichernd wie das Glasdach eines Treibhauses. Schwankende CO_2-Gehalte sollten den folgenden Zyklus auslösen.

Ein erhöhter CO_2-Gehalt der Luft begünstigt die Photosynthese der Pflanzen. Die Pflanzendecke der Erde breitet sich aus. Der CO_2-Gehalt verringert sich durch die größere Assimilationsleistung. Hierdurch wird der erwähnte Treibhauseffekt herabgesetzt. Die Erde kühlt ab und löst ein Wachstum der Gletscher aus. Zugleich verkleinert sich wieder die mit Pflanzen bewachsene Fläche, der CO_2-Gehalt der Atmosphäre steigt erneut an und bewirkt eine Wiedererwärmung mit einem Rückzug des Gletschereises.

Diese Hypothese hat sich nicht durchsetzen können, da die regulierende Funktion der Ozeane außer acht gelassen wurde. Der ansteigende CO_2-Gehalt der Luft in Kaltzeiten würde nämlich, so wird argumentiert, durch die dann erhöhte Löslichkeit dieses Gases im Ozeanwasser kompensiert werden.

Eine andere bemerkenswerte Theorie geht auf den französischen Mathematiker J. F. ADHÉMAR zurück. Seine Veröffentlichung aus dem Jahre 1842 trägt den Titel „Les révolutions de la mer, déluges périodiques“ (deutsch: Die Revolutionen des Meeres, regelmäßig wiederkehrende Fluten). Er verwies darauf, daß die Jahresabschnitte zwischen den Äquinoktialpunkten im Frühling

und Herbst wegen der Exzentrizität der Erdbahn beim Umlauf um die Sonne nicht gleich lang seien. Da sich die Erdbahn bald einer verlängerten Ellipse und bald einem Kreis nähert, schloß er auf zeitweilig langandauernde Winterkälte und leitete daraus periodisch auftretende Eiszeiten auf jeweils einer Halbkugel ab. Der Annahme, daß die wärmeren Sommer in Sonnennähe nicht imstande seien, die sich ansammelnden Eismassen abzuschmelzen, wurde allerdings mißtraut. Der englische Astronom JOHN HERSCHEL (1792–1871) war schon vorher zu der Erkenntnis gelangt, daß trotz ungleicher Entfernungen und unterschiedlicher Strahlungsintensität in den gleichen Jahreszeiten beide Halbkugeln dieselbe Wärmemenge von der Sonne erhalten. Er besann sich dann jedoch anders und räumte großen Veränderungen der Exzentrizität einen Einfluß auf die Klimaverhältnisse der Erdhälften ein. Als nächster griff der schottische Mathematiker JAMES CROLL (1821–1890) den Gedanken auf. Im Jahre 1864 veröffentlichte er eine Betrachtung über die physikalische Ursache des Klimawechsels in geologischen Epochen im Philosophical Magazine, in der er die Theorie neu begründete und verbesserte. Er legte dar, daß das Klima fortwährend Schwankungen unterworfen sei, und entkleidete dadurch die Eiszeiten ihres Katastrophencharakters. Die ADHEMAR-CROLLsche Theorie blieb jedoch umstritten. Zu den Kritikern zählte u. a. auch ALBRECHT PENCK. Sie wurde im Jahre 1924 von dem aus St. Petersburg gebürtigen und in Graz gestorbenen Meteorologen und Klimatologen WLADIMIR KÖPPEN (1846–1940) im modifizierter Form wieder aufgenommen. Er veröffentlichte seine Thesen in dem Werk „Die Klimate der geologischen Vorzeit“, das er zusammen mit dem in Grönland ums Leben gekommenen Geophysiker und Meteorologen ALFRED WEGENER (1880–1930), seinem Schwiegersohn, verfaßt hatte. Grundlage der Überlegungen KÖPPENS war eine Kurve der Strahlungsintensität der Sonne, die der Professor und Direktor der Belgrader Sternwarte MILUTIN MILANKOVITCH (1879–1958) neu berechnet hatte. Die MILANKOVITCH-Kurve weist für die letzten 650 000 Jahre vier Paare starker Ausschläge nach unten auf, die den vier klassischen Eiszeiten zugeordnet wurden. Es hat in der folgenden Zeit nicht an Versuchen gefehlt, die astronomische Strahlungskurve mit geologischen Beobachtungen in Einklang zu bringen. Zu den Verfechtern der MILANKOVITCH-Kurve gehört in neuerer Zeit auch EMILIANI, der eine annähernde Übereinstimmung der Zykluslängen zwischen seiner Sauerstoffisotopenkurve von carbonatischen Foraminiferenschalen aus Tiefseeablagerungen mit der Strahlungskurve zu erkennen glaubt. Dennoch ist die Hypothese nicht unbestritten. Der Kritik, daß die Änderungen der astronomischen Elemente zu allen Zeiten bestanden hätten und deshalb auch zu allen Zeiten Vereisungen hätten stattfinden müssen, begegnete KÖPPEN mit dem Argument, die astronomischen Klimaschwankungen erklärten nur den Rhythmus, nicht jedoch die tiefere Ursache der Eiszeiten. Als solche führte er u. a. eine andere

Verteilung der Kontinente im Einklang mit den Thesen ALFRED WEGENERS und Polverlagerungen an. Als Kritik wurde ferner vorgebracht, daß die gleichzeitige Vereisung der Nord- und Südhalbkugel nicht in die Theorie passe. Schließlich wurde darauf hingewiesen, daß die nacheiszeitliche Klimageschichte in der Strahlungskurve keine Erklärung fände. Ein endgültiges Urteil über den Wert der Strahlungskurve wird erst möglich sein, wenn das Bild des Eiszeitalters durch weitere absolute Altersdatierungen vervollkommnet worden ist.

Schriftenverzeichnis

ADHEMAR, J. F. (1842): Les révolutions de la mer, déluges périodiques. – Paris.

AGASSIZ, L. (1840): Etudes sur les glaciers. – 346 S.; Neuchâtel.

AGASSIZ, L. (1841): Untersuchungen über die Gletscher. – Solothurn.

ARRHENIUS, S. (1896): On the influence of the carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. – Phil. Mag., **41;** London.

BALMER, H. (1969): JEAN DE CHARPENTIER. – Gesnerus, **26**: 213–232; Aarau.

BALMER, H. (1970): IGNATZ VENETZ. – Gesnerus, **27**: 138–168; Aarau.

BALMER, H. (1974): LOUIS AGASSIZ. – Gesnerus, **31**: 1–18; Aarau.

BERNHARDI, A. (1832): Wie kamen die aus dem Norden stammenden Felsbruchsteine und Geschiebe, welche man in Norddeutschland und den benachbarten Ländern findet, in ihre gegenwärtigen Fundorte? – Leonh. & Bronns Jb. Min. Geognosie Geol. Petrefaktenkde., **3**: 257–267 u. 419; Heidelberg.

BRUNHES, B. (1906): Recherches sur le direction d'aimanation des roches volcaniques. – J. phys., **5**: 705–724. [Zitiert nach WATKINS, N. D. (1972)]

BUCH, L. v. (1810): Reise durch Norwegen und Lappland, **2**; Berlin

BUCKLAND, W. (1823): Reliquiae Diluvianae. – 303 S.; London (J. Murray).

CHARPENTIER, J. de (1834): Annonce d'un des principaux résultats de M. VENETZ sur l'état actuel et passé des glaciers du Valais. – Verh. schweiz. naturf. Ges.; Luzern. [Auch in Annales mines, 1835, Sér. III, vol. 3: 319 f.]

CHARPENTIER, J. de (1841): Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône. – 363 S.; Lausanne (Ducloix).

COX, A. (1969) Geomagentic reversals. – Science, **163**: 237–245, 8 Abb. 2 Taf.; Washington D.C. [Reprint in KENNETT, J. P. (Ed.): Magnetic Stratigraphy of Sediments. – Benchmark Papers in Geology, **54**: 13–21; Stroudsburg/Pennsylvania 1980]

CROLL, J. (1864): On the Physical Cause of the Change of Climate during Geological Epochs. – Phil. Mag., **4**: 28–93; London.

CUVIER, G. (1812): Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes. 4 Bde.; Paris.

CUVIER, G. (1826): Discours sur les révolutions de la surface du Globe. – Paris.

DEPERET, Ch. (1918) Essai de coordination chronologique générale des temps quaternaires. – C. R. Acad. Sci., **167**: 418–422; Pairs.

EMILIANI, C. (1955): Pleistocene temperatures. – J. Geol., 63: 538–578; Chicago.

EMILIANI, C. (1972): Quaternary paleotemperatures and the duration of the high temperature intervals. – Science, 178: 398–401; Washington D.C.

EMILIANI, C. & GEISS, J. (1957): On glaciations and their changes. – Geol. Rdsch., **46**: 567–601; Stuttgart.

EMILIANI, C. & SHACKLETON, N. J. (1974): The Brunhes Epoch: isotopic paleotemperatures and geochronology. – Science, **183**: 511–514; Washington D.C.

FRAAS, O. (1866): Vor der Sündfluth! Eine Geschichte der Urwelt. – 512 S., 162 Abb., 25 Taf.; Stuttgart.

FRÄNGSMYR, T. & KÖNIGSSON, L.-K. (1978): OTTO TORELL und die Entwicklung der Eiszeitforschung in Schweden. – Schr.-R. geol. Wiss., **9**: 21–33; Berlin (Akad. Verlag).

GEIKIE, J. (1874): The Great Ice Age and its Relation to the Antiquity of Man. – 575 S., 56 Abb., 16 Taf.; London.

GIGNOUX, M. (1913): Les formations marines pliocènes et quaternaires de l'Italie du Sud et de la Sicile. – Ann. Univ. Lyon, N.S., **1**: XXIV+693 S., 42 Abb.; Lyon, Paris.

GRAHLE, H.-O. (1936): Die Ablagerungen der Holsteinsee (Mar. Interglaz. I.), ihre Verbreitung, Fossilführung und Schichtenfolge in Schleswig-Holstein. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N.F., **172**: 110 S., 14 Abb., 1 Taf.; Berlin. [Hierin werden die Hinweise auf die Verdienste von G. FORCHHAMMER und W. WOLFF gegeben]

HANTKE, R. (1978): Eiszeitalter, **1**: 468 S., 221 Abb.; Thun (Ott Verlag).

HERNECK, H. (1978): Entwicklung und Bedeutung der Glazialtheorie. — Schr.-R. geol. Wiss., **9**: 9—20; Berlin (Akad. Verlag).

HÖLDER, H. (1960): Geologie und Paläontologie in Texten und ihrer Geschichte. – 565 S., 51 Abb.; Freiburg, München (K. Alber).

IKEYA, M. & OHMURA, K. (1981): Dating fossil shells with Electron Spin Resonance. – J. Geol, **89**: 247–251, 3 Abb.; Chicago.

JENTZSCH, A. (1908): Die erste Yoldia aus Posen. – Jb. preuß. geol. L.-Anst., 1905, **26**: 173–177; Berlin.

KÖPPEN, W. & WEGENER, A. (1924): Die Klimate der geologischen Vorzeit. – 255 S., 41 Abb., 1 Taf.; Berlin (Borntraeger).

KUHN, Th. S. (1962): The Structure of Scientific Revolutions. – Chicago (Univ. Press). [deutsch (1967): Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen]

KUKLA, G. J. (1977): Pleistocene Land-Sea Correlation. I. Europe. – Earth-Sci. Rev., **13**: 307–374, 21 Abb., 3 Tab.; Amsterdam (Elsevier).

LIBBY, W. F. (1955): Radiocarbon dating. – 2. Aufl.: 175 S.; Chicago (Univ. Press).

LYELL, Ch. (1839): Nouveaux éléments de géologie. – 648 S.; Paris (Pitois-Levrault).

MANKINEN, E. A. & DALRYMPLE, G. B. (1979): Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0–5 m.y.B.P. – J. geophys. Res., (B), **84**: 615–626; Washington D.C.

MARIETAN, I. (1959): La vie et l'oeuvre de l'ingenieur IGNACE VENETZ. – Bull. Murithienne, **76**: 1–51; Sion.

MATUYAMA, M. (1929): On the direction of magnetization of basalt in Japan, Tyosen and Manchuria. – Japan Akad. Proc., **5**: 203–205. [Zitiert nach WATKINS, N. D. (1972)]

MILANKOVITCH, M. (1938): Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate. – In: GUTENBERG, B. [Hrsg.]: Handbuch der Geophysik, **9**, 3; Berlin.

MORLOT, A. DE (1854): Deux époques glaciaires dans la vallée du Rhône. — Bull. Soc. vaud. Sci. nat., **3**: 39, 41, 53 u. 185; Lausanne.

MÖRNER, N. A. (1981): Eustasy, paleoglaciation and paleoclimatology. – Geol. Rdsch., **70**: 691–702; Stuttgart.

NILSSON, T. (1983): Pleistocene: Geology and life in the Quaternary Ice Age. – 651 S., 301 Abb., 25 Tab.; Stuttgart (Enke).

PENCK, A. (1879): Die Geschiebeformation Norddeutschlands. – Z. deutsch. geol. Ges., **31**: 117–203; Berlin.

PENCK, A. (1882): Die Vergletscherung der deutschen Alpen, ihre Ursachen, periodische Wiederkehr und ihr Einfluß auf die Bodengestaltung. – 483 S., 16 Abb.; Leipzig (J. A. Barth).

PENCK, A. (1922): Die Eem-Schwingung. – Verh. geol. mijnbouwkundig Genootschap voor Nederl. en Kol., **4**. [Zitiert nach GRAHLE, H.-O. (1936)]

PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter, **1**: 393 S., 56 Abb., 11 Taf., 8 Kt.; Leipzig (Tauchnitz). [Von der Sektion Breslau des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins gekrönte Preisschrift in drei Bänden]

PLAYFAIR, J. (1802): Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth. – 528 S.; Edinburgh (W. Creech). [Faksimile ed . ED. GEORGE W. WHITE, Urbana 1956]

PORTMANN, E. (1975): Deux siècles de géologie à Neuchâtel. – Gesnerus, **32**: 45–59; Zürich. [Zitiert nach SCHWARZBACH, M. (1981)]

RADTKE, U. & HENNING, G. J. & MANGINI, A. (1982) Untersuchungen zur Chronostratigraphie mariner Terrassen in Mittelitalien – ^{230}Th/^{234}U- und ESR-Datierung an fossilen Mollusken. – Eiszeitalter u. Gegenwart, **32**: 49–55, 1 Abb., 2 Tab.; Hannover.

SCHIMPER, K. (1837): Über die Eiszeit. – Actes Soc. helv. Sci. nat., **22**: 38–51.

SCHWARZBACH, M. (1974): Das Klima der Vorzeit. – 3. Aufl: 380 S.; Stuttgart (Enke).

SCHWARZBACH, M. (1981): Denkmäler und Gedenktafeln von Eiszeitforschern in Mittel-Europa. – Eiszeitalter u. Gegenwart, **31**: 1–15, 16 Abb.; Hannover.

SHACKLETON, N. J. & OPDYKE, N. D. (1977): Oxygen isotope and palaeomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation. – Nature, **270**: 216–219, 2 Abb., 2 Tab.; London.

VENETZ, I. (1830): Sur l'ancienne extension des glaciers, et sur leur retraite dans leurs limites actuelles. – Actes Soc. helv. Sci. nat., Grand St.-Bernard 1829.

VENETZ, I. (1833): Mémoire sur les variations des températures dans les Alpes de la Suisse. – Denkschr. allg. schweiz. Ges. ges. Naturwiss., **1**,2 [1822 in Bern bei der 8. Versammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft gekrönte Preis-schrift]

WAGENBRETH, O. (1960): Aus der Vorgeschichte von TORELLS Glazialtheorie. – Ber. geol. Ges. DDR, **5**: 175–190; Berlin.

WAGENBRETH, O. (1978): Die Feuersteinlinie in der DDR, ihre Geschichte und Popularisierung. – Schr.-R. geol. Wiss., **9**: 339–368, 6 Abb., 3 Tab.; Berlin.

WATKINS, N. D. (1972): Review of the development of the geomagnetic polarity time scale and discussion of prospects for its finer definition. – Bull. geol. Soc. America, **83**: 551–574, 4 Abb. [Reprint in KENNETT, J. P. (Ed.): Magnetic Stratigraphy in Sediments. – Benchmark Papers in Geology, **54**: 22–45; Stroudsburg/Pennsylvania 1980]

WOLDSTEDT, P. (1969): Quartär. – In: LOTZE, F. [Hrsg.]: Handbuch der stratigraphischen Geologie, **2:** 263 S., 77 Abb., 16 Tab.; Stuttgart (Enke).

ZAGWIJN, W. H. (1957): Vegetation, climate and time-correlation in the Early Pleistocene of Europe. – Geol. Mijnb., N.S., **19**: 233–244; s'Gravenhage.

ZAGWIJN, W. H. & VAN MONTEFRANS, H. M. & ZANDSTRA, J. G. (1971): Subdivision of the „Cromerian" in the Netherlands; pollen-analysis, palaeomagnetism and sedimentary petrology. – Geol. Mijnb., N.S., **50**: 41–58; s'Gravenhage.

ZITTEL, K. A. v. (1899): Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahrhunderts. – Geschichte d. Wiss. Deutschld., Neuere Zeit, **23:** 868 S.; München, Leipzig (Oldenbourg).